



# Conception d'un réseau de chaleur avec stockage en fonctionnement multi-période

Sahar Salame, Assaad Zoughaib

## ► To cite this version:

Sahar Salame, Assaad Zoughaib. Conception d'un réseau de chaleur avec stockage en fonctionnement multi-période. Congrès Français de Thermique, Jun 2014, Lyon, France. hal-01299935

**HAL Id: hal-01299935**

**<https://hal-mines-paristech.archives-ouvertes.fr/hal-01299935>**

Submitted on 8 Apr 2016

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Conception d'un réseau de chaleur avec stockage en fonctionnement multi-période.

Sahar SALAME\*, Assaad ZOUGHAIB

Centre Efficacité énergétique des Systèmes – CES, Mines-Paristech

5 Rue Léon Blum, 91120, Palaiseau

\*(auteur correspondant : [sahar.salame@mines-paristech.fr](mailto:sahar.salame@mines-paristech.fr))

## Résumé

L'objectif du travail présenté dans ce papier est de concevoir un réseau de d'échange de chaleur sur des procédés variables dans le temps en prenant en compte des stockages de chaleur à températures constantes. La conception se fait selon une approche en multi-périodes. Ces stockages permettront d'augmenter la flexibilité du réseau. Un tel réseau permettrait aussi d'évaluer l'intérêt d'intégrer des systèmes de conversion d'énergie (PAC, ORC, ...) qui ne trouvent pas de rentabilité économique dans ce genre de procédés si l'analyse se fait classiquement.

## Nomenclature

$COP$	Coefficient de performance de PAC	$QH$	Besoin en chauffage, $kW$
$CP$	Capacité calorifique, $kW/^\circ C$	$Stock[k,m]$	Contenu du Stock k à la période m, $kJ/^\circ C$
$Ex_c$	Exergie de l'utilité chaude, $kW$	$t[i]$	Durée de la période i, s
$Ex_f$	Exergie de l'utilité froide, $kW$	$T[i]$	Température du Nœud i du flux, $^\circ C$
$mCp_{entrant}$	Débit $mCp$ entrant au stock, $kJ/^\circ C/s$	$T[k]$	Température du Nœud k des stocks, $^\circ C$
$mCp_{sortant}$	Débit $mCp$ sortant du stock, $kJ/^\circ C/s$	$W$	Puissance électrique du compresseur, $kW$
$PAC_{cond}$	Puissance au condenseur de la PAC, $kW$	$X[i,k]$	Portion de chaleur cédée par l'intervalle i du flux chaud à l'intervalle k du fluide intermédiaire.
$PAC_{evap}$	Puissance à l'évaporateur de la PAC, $kW$	$Y[i,k]$	Portion de chaleur cédée par l'intervalle k du fluide intermédiaire à l'intervalle i du flux froid.
$Q$	Puissance, $kW$	$\Delta T$	Différence de température, $^\circ C$
$Q_c$	Besoin en froid, $kW$		

## 1. Introduction

La réduction des émissions de gaz à effet de serre et principalement du  $CO_2$  est aujourd'hui un enjeu planétaire souligné par les accords de Kyoto. Face à ce constat et depuis de nombreuses années maintenant, d'énormes efforts sont consacrés à l'efficacité énergétique des procédés notamment ceux qui font appel à des opérations thermiques. L'une des voies suivies pour réduire la consommation d'énergie de ces procédés est l'intégration énergétique

entre les flux chauds à refroidir (besoin de froid) et les flux froids à chauffer (besoins de chaud).

### 1.1. Intégration énergétique

Les méthodes d'intégration énergétique ont beaucoup évolué depuis l'apparition de la méthode de pincement proposée par Linhoff en 1979 [2]. Ces méthodes mettent en évidence la récupération de l'énergie entre des flux à chauffer et des flux à refroidir en aidant à la conception d'un réseau d'échange thermique. La conséquence est une réduction des besoins de chaleur et de froid. La méthode de pincement est une méthode graphique qui repose sur les courbes composites des flux et la grande courbe composite.

### 1.2. Courbes composites

Les courbes composites sont des moyens pour visualiser les flux chauds et froids, et le potentiel de récupération entre ces flux. En d'autres termes c'est le moyen pour visualiser les cascades de chaleur relatives aux flux. Dans chaque intervalle de température la puissance  $Q$  est calculée, et le diagramme  $(Q,T)$  est tracé pour chaque type de flux (chaud et froid).

$$Q = CP \times \Delta T \quad (1)$$

Ainsi, il est possible de mettre en évidence graphiquement le pincement du procédé, la capacité minimale requise de l'utilité chaude et celle de l'utilité froide. La figure (1) montre un exemple des courbes composites. Elle représente la variation de demande en chauffage et en refroidissement par tranche de température.  $Q_c$  représente la demande en refroidissement et  $Q_H$  celle de chauffage après avoir effectué tout échange possible entre les flux chauds et les flux froids.

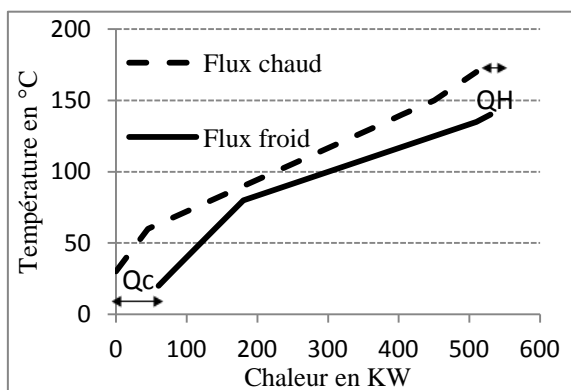


Figure 1: Courbes composites chaudes et froides.

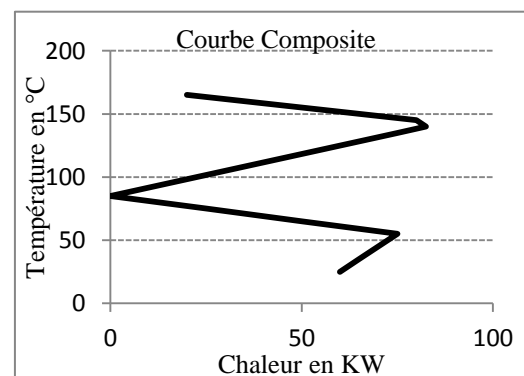


Figure 2: Grande courbe composite

La grande courbe composite est construite par la mesure de l'écart en toute température entre les deux courbes composites figure (2). Le pincement correspond à la température à laquelle la grande courbe composite touche l'axe des ordonnées (celui des températures) i.e. la température à laquelle il y a pas d'échange entre les deux flux chaud et froid. Au dessus de cette température la courbe composite représente le besoin net en chauffage à chaque température et au dessous de cette température elle représente le besoin net en refroidissement.

### 1.3. Systèmes variables

La méthode de pincement présentée dans le paragraphe précédent permet l'intégration énergétique entre les flux chauds et froids qui sont présents en même temps. Cependant, dans beaucoup de situations, les besoins en énergie et sa production sont variables en fonction du temps. Un tel système nécessite une conception de réseau flexible. Les procédés variables en

fonction du temps sont appelés multi-période ou « Batch plants ». Cet aspect dynamique de la demande et de l'offre de l'énergie rend la formulation des méthodes actuelles d'intégration énergétique non adaptées. Ainsi, de nouvelles formulations adaptées doivent être mises en place.

## **2. Travaux menés sur l'intégration énergétique des systèmes variables**

Les travaux méthodologiques menés sur la conception de réseaux flexibles sont moins importants que ceux sur l'intégration énergétique des procédés continus. Certains ont considéré les travaux sur l'optimisation économique du réseau d'échangeur en régime variable sans introduction de stockage [1]. Ces travaux ont présenté une procédure systématique pour introduire l'intégration énergétique et ce qu'on appelle « rescheduling » ou optimisation de l'ordonnancement des périodes du processus dès la phase de conception.

D'autres ont trouvé que pour pouvoir intégrer énergétiquement un système variable, le stockage s'avère un élément indispensable.

Les travaux réalisés sur le stockage d'énergie, couplé avec l'intégration énergétique de la méthode du pincement sont très rares et timides. L'un des travaux les plus importants est celui de Kemp et Deakins [2] qui ont fondé en 1989 une méthode d'analyse rigoureuse capable de fournir dans quelle période et sur quel niveau de température un stockage est indispensable. Selon cette méthode, les cascades de chaleur sont tracées pour tous les flux dans toutes les périodes et les niveaux de température du pincement sont déterminés pour chaque période. Ensuite, une analyse est effectuée pour quantifier l'énergie pouvant être récupérée au dessus du niveau du pincement dans une période et cédée en dessous du niveau du pincement dans une autre période. Ceci peut augmenter d'une façon remarquable la capacité de récupération d'énergie. Ainsi, la capacité des stocks, leurs niveaux de températures et leurs modes de fonctionnement sont déterminés.

Il faut noter que, malgré le fait que cette méthode a été fondée et testée, les algorithmes de calculs sont très compliqués et aucun logiciel commercial utilisant cette méthode existe actuellement sur le marché.

D'autres techniques d'intégration énergétique conduisent à des solutions sous-optimales à cause d'un « Schedule » ou « ordonnancement du processus » prédéfini imposé.

D'autres travaux sur les méthodes d'intégration énergétique des procédés variables ont étudié l'échange de chaleur entre des flux chauds à refroidir et des flux froids à chauffer pour réduire les consommations des utilités. Vaklieva-Bancheva et al. [3] ont considéré une intégration énergétique directe avec l'objectif de minimisation des coûts totaux. La fonction objective non-linéaire a été linéarisée avec des variables et des contraintes supplémentaires et la résultante est une formulation MILP résolue à l'optimalité globale. Wang et Smith [4] ont proposé une méthode graphique d'intégration énergétique adaptée pour le fonctionnement multi-période en se basant sur la méthode de pincement. La courbe composite est tracée sous forme de l'énergie échangée en fonction du temps. Le temps est considéré comme première contrainte et la faisabilité de température de stock comme étant la deuxième contrainte. Dans cette formulation, les deux types d'échange sont considérés : l'échange direct entre les flux et l'échange indirect.

Au lieu d'analyser les flux en multi-période de point de vue thermodynamique, Uhlenbruck et al. [5] ont proposé de commencer d'abord par synthétiser tous les réseaux d'échangeurs possibles pour effectuer l'échange direct. On a ainsi deux intervalles de temps et de température. Un flux chaud peut échanger avec un flux froid en utilisant un échangeur à contre-courant. L'intégration énergétique est améliorée ainsi en associant les résidus avec des

flux qui n'ont pas encore échangé. Pourtant cette méthode n'a pas pu atteindre l'optimum thermodynamique.

De Boer et al. [6] ont étudié un système de stockage de chaleur industriel au sein d'une installation de production existante. Trois types de stockage ont été conçus pour stocker la chaleur sortante d'une réaction exothermique et la réutiliser dans les étapes qui suivent. Des réductions de consommation de 50% et 70% ont été atteints, pourtant le temps de retour sur investissement était supérieur à 10 ans. L'intégration énergétique directe d'une période à une autre n'était pas pratique pour des questions de contrôle.

Chen et Ciou [7] ont considéré seulement l'échange indirect (en utilisant un fluide d'échange intermédiaire) et résolu une formulation MINLP (non-linéaire) avec un solveur global. Il y a une possibilité d'avoir plusieurs stockages, mais ces stockages additionnels ne garantissent pas une intégration énergétique améliorée.

Le travail de Majozi [8] a été complété [9] pour inclure un stockage de chaleur pour l'intégration énergétique indirecte. La capacité de stockage ainsi que sa température initiale étaient pourtant des paramètres prédéfinis. Même si cette méthode a conduit à une formulation MILP, des résultats sous-optimaux ont été obtenus puisque la température des stocks et leur capacités était prédéfinie.

Après avoir présenté les travaux effectués sur l'intégration énergétique en multi-période, on trouve que la plupart des méthodes reposent sur un type d'intégration (directe ou indirecte). Dans le cas où le stockage est introduit et les deux types d'intégrations sont utilisées, on a considéré un seul stock avec une capacité et une température initiale prédéfinies, et des solutions sous-optimales sont obtenues. Dans cet article, on va traiter l'intégration indirecte avec plusieurs stocks. La capacité des stocks et leurs températures initiales sont optimisées pour réduire les utilités. Des systèmes de conversion d'énergie sont utilisés entre les stocks. Leur nombre peut être limité par une contrainte et leurs puissances sont calculées. Une formulation MILP est ainsi obtenue et appliquée sur un exemple de calcul, les résultats sont présentés et analysés.

### **3. Formulation du problème**

Le problème formulé est un problème d'optimisation linéaire et combinatoire MILP (Mixed Integer Linear Programming). Une fonction à minimiser est soumise à un nombre de contraintes correspondant au problème voulu. Dans notre cas, un réseau de chaleur est conçu pour échanger entre des flux chauds et froids en fonctionnement multi-période. A chaque niveau de température (nœud) on a un stock de chaleur potentiel.

Les données ou entrées de cet algorithme sont :

- Le nombre de période de fonctionnement ;
- Le nombre de flux chauds et froids avec leurs niveaux de températures, leurs débits massiques et leurs capacités calorifiques ;
- Le nombre d'intervalles de températures (discrétisation) ;
- Le pincement de température d'échange entre le fluide intermédiaire et le flux ;
- Le nombre de pompes à chaleur maximal voulu : le nombre de pompes à chaleur est fixé pour plusieurs raisons (contraintes industrielles, coût d'investissement élevé,...)

Les sorties de l'algorithme:

- Le nombre de stockage et la capacité de chaque stock ;
- Les températures de chaque stock ;
- Les puissances thermiques échangées à chaque période ;

- Les puissances des pompes à chaleur à chaque période : les pompe à chaleur prélèvent la chaleur et fournissent la chaleur au niveau des stocks.

Ainsi le code pourra indiquer l'emplacement des stocks, des pompes à chaleurs et des échangeurs de chaleur et par suite aider à la conception du réseau de chaleur.

Les températures des stocks possibles sont situées de part et d'autre des températures des nœuds après discrétisation. La différence entre la température du nœud et celle du stock est égale à la valeur du pincement choisi.

La fonction à minimiser est la consommation d'exergie des utilités chaudes et froides dans chaque période ainsi que les consommations électriques des pompes à chaleur :

$$\text{Minimiser: } \sum_{i=1}^{nb \text{ Périodes}} (Ex_c + Ex_f + W) \times t[i] \quad (2)$$

La minimisation de cette fonction objective est soumise aux contraintes suivantes :

- Deux contraintes qui expriment le bilan d'énergie sur chaque intervalle de température des flux. Un flux peut échanger avec le fluide intermédiaire ou avec une utilité (chaude si le flux est froid et froide si le flux est chaud).

$$CP. (T[i] - T[i + 1]) = UF[i] + \sum_{T[i] > T[k] \text{ et } T[i+1] > T[k+1]} x[i, k]. (T[k] - T[k + 1]) \quad (3)$$

$$CP. (T[i] - T[i + 1]) = UC[i] + \sum_{T[k] > T[i] \text{ et } T[k+1] > T[i+1]} y[i, k]. (T[k] - T[k + 1]) \quad (4)$$

- Des contraintes exprimant le bilan énergétique sur les stocks : la variation de la quantité de chaleur stockée est la différence entre la quantité entrante et la quantité sortante dans chaque période. Il faut noter que la quantité entrante peut être celle du condenseur d'une pompe à chaleur dont l'évaporateur est sur un autre stock. De la même façon, la quantité sortante peut être celle d'un évaporateur dont le condenseur est sur un autre stock.

$$Stock[k, m + 1] = Stock[k, m] + mCp_{entrant} \cdot t[i] - mCp_{sortant} \cdot t[i] + PAC_{cond} / (T[k] - T[k + 1]) \cdot t[i] - PAC_{evap} / (T[k] - T[k + 1]) \cdot t[i] \quad (5)$$

- Une contrainte exprimant la loi des nœuds sur chaque nœud du fluide intermédiaire.
- Une contrainte exprimant que la chaleur existante dans un intervalle de température entre deux stocks dans le fluide intermédiaire ne peut provenir que des échanges avec le flux chaud et ne peut être cédée que par un échange avec un flux froid.
- Une contrainte qui oblige le stock à avoir des quantités de chaleur initiale et finale égales.
- Une contrainte qui oblige la quantité de chaleur présente dans un stock à être positive dans toutes les périodes.
- Une contrainte qui limite le nombre de PAC utilisées sur toutes les périodes au nombre voulu par l'utilisateur.
- Une contrainte qui relie la puissance à l'évaporateur, celle au condenseur et celle du compresseur au COP de la PAC.

$$COP. (PAC_{cond} - PAC_{evap}) = PAC_{cond} \quad (6)$$

Le COP de chaque PAC est calculé en supposant un rendement par rapport au COP de Carnot calculé en fonction des températures de source et de puits de la PAC.

## 4. Cas d'application

### 4.1. Données

L'étude portera sur un exemple d'un processus de deux périodes à deux flux dans chacune : un flux froid et un flux chaud. Cet exemple a été choisi pour sa simplicité (Tableau 1) et sa capacité de montrer les points forts et faibles de la méthode.

Flux	Période	T <sub>in</sub> °C	T <sub>out</sub> °C	CP= m*Cp kW/°C
1	1	30	50	2
2	1	100	20	5
2	2	40	80	5
4	2	60	20	3

Tableau 1: Exemple de calcul

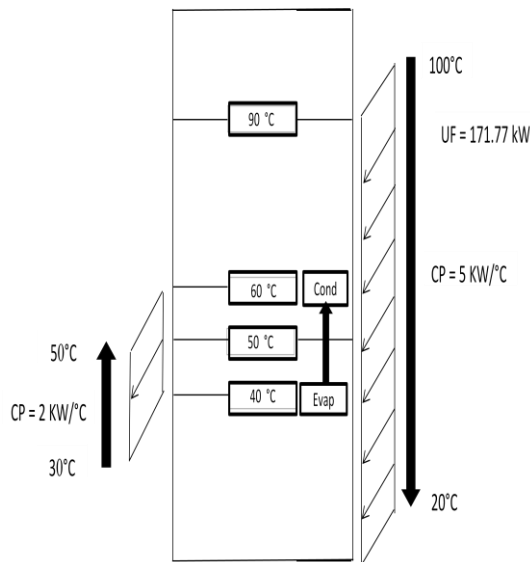


Figure 3: Conception du réseau: période 1

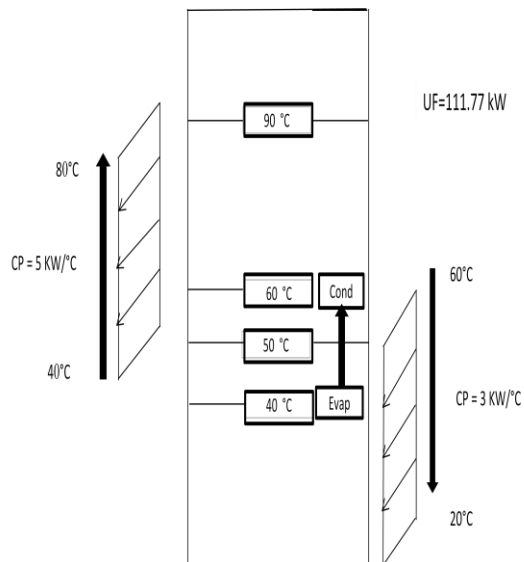


Figure 4: Conception du réseau : la période 2

Les deux périodes sont de même durée. Chaque flux chaud peut céder sa chaleur au fluide intermédiaire ou à une utilité froide. De la même façon, chaque flux froid peut recevoir de la chaleur du fluide intermédiaire ou d'une utilité chaude. Le fluide intermédiaire circule dans un réseau et échange avec les flux et des stocks à des températures bien définies. Chaque stock reçoit de la chaleur du fluide intermédiaire ou d'une utilité chaude ou du condenseur d'une pompe à chaleur dont l'évaporateur est situé sur un autre stock et cède sa chaleur au fluide intermédiaire ou à une utilité froide ou à un évaporateur d'une pompe à chaleur dont le condenseur est sur un autre stock. Les températures sont discrétisées avec un pas de 10°C.

Un pincement de 10°C entre le fluide intermédiaire et chacun des flux est considéré. Les stocks potentiels sont à + ou - Pinc des nœuds de températures. Par la suite on a 11 stocks potentiels. Les stocks dans cet exemple sont des stocks de chaleur sensible à volumes variables i.e. chaque stock est un stock du fluide intermédiaire qui circule dans le réseau.

### 4.2. Résultats

En prenant d'abord l'exemple avec aucune pompe à chaleur, on obtient des besoins en utilité chaude de 20 KW à la deuxième période et des besoins en utilité froide de 300 KW distribués entre les deux périodes 1 et 2. Trois stocks sont indispensables pour faire

l'intégration énergétique dans ce cas : 90°C, 60°C et 40°C. L'eau est le fluide intermédiaire qui circule dans le réseau. La variation du volume de l'eau stockée dans chaque stock est tracée à la figure 5. Une hypothèse de pincement nul au stock est prise (le stock est un stock de fluide qui circule dans le réseau). Les résultats sont ainsi comparés avec la méthode de pincement classique (figure 6).

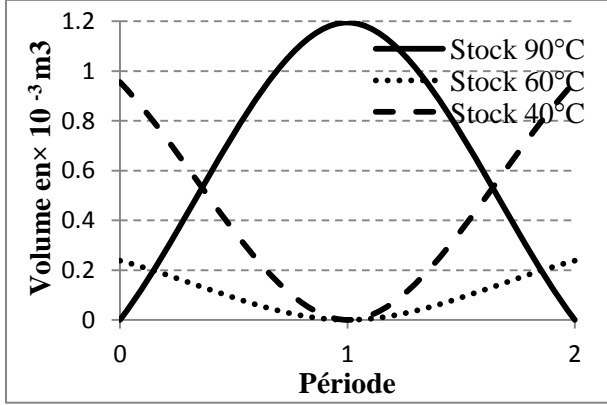


Figure 5: Variation du volume des stocks en fonction des périodes, cas1

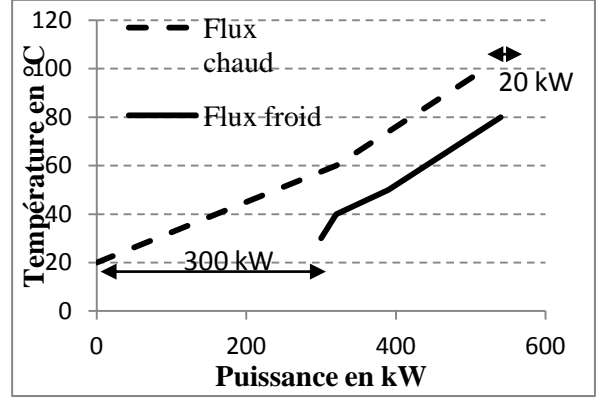


Figure 6: Courbes composites des flux intégrés sur le temps, Cas 1.

Le pincement se situe à 50°C. Le besoin de chauffage est de 20KW et le besoin de refroidissement est de 300KW. Ce qui valide le modèle de base.

En ajoutant la contrainte d'utilisation d'une seule pompe à chaleur, les utilités froides sont réduites à 282.4 KW et les utilités chaudes à Zéro. Une pompe à chaleur est utilisée : l'évaporateur est à la température 40°C et il puise une puissance de 17.59 KW et le condenseur à la température de 60°C fournit une puissance de 20 KW et cette PAC fonctionne pendant la deuxième. Deux stocks à deux températures 90°C et 50°C sont utilisés (figures 3 et 4), la variation du volume de l'eau stockée dans chaque stock en fonction du temps est tracée à la figure 7.

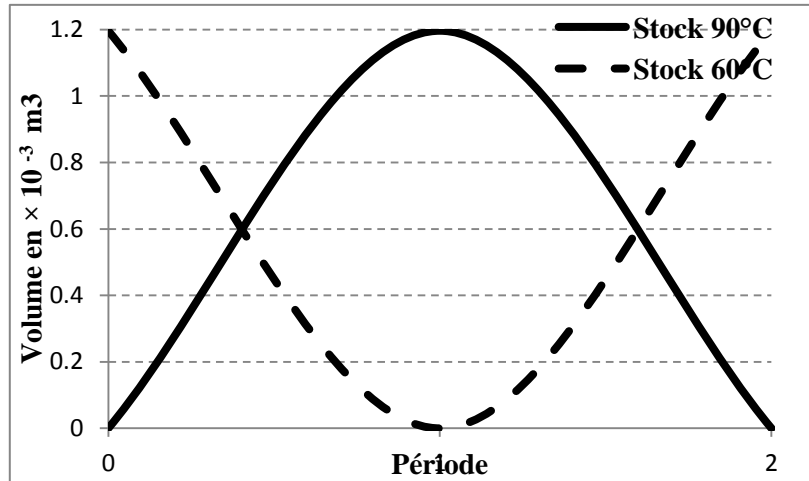


Figure 7: Variation du volume des stocks en fonction des périodes, cas2

En prenant une température de référence de  $T_0 = 283 \text{ K}$ , l'exergie consommée est calculée selon la formule suivante :

$$\text{Exergie} = Q \cdot \left(1 - \frac{T_0}{T_{\text{Source}}}\right) \quad (7)$$



Les utilités chaudes sont supposées fournies à 900°C (chaudière) et les utilités froides à 10°C.

Cas	Ex Chaude	Ex Froide	Ex compresseur	Ex Totale
	kW	kW	kW	kW
1	15.17	0	0	15.17
2	0	0	2.41	2.41

Tableau 2: Comparaison des exergies consommées dans les deux cas

Les résultats montrent une réduction des exergies dépensées dans le deuxième cas. Ainsi, une première conception du réseau de chaleur peut être faite (figures 3 et 4). Un dimensionnement des échangeurs ainsi que des pompes à chaleurs peut être fait. Pour étudier la faisabilité de ces solutions, une étude économique est indispensable

## 5. Conclusions

Ainsi, un algorithme permettant l'intégration énergétique des flux chauds et froids en fonctionnement multi-période est écrit. Cet intégration se produit à travers d'un fluide intermédiaire et de l'intégration des stockages thermique. Les résultats comparés avec la méthode d'intégration énergétique classique (méthode du pincement) valide le modèle de base.

L'intégration des pompes à chaleur entre les stocks a ensuite été étudiée. Une optimisation énergétique a montré une réduction des utilités dans le cas avec utilisation de PAC. La pompe à chaleur fonctionne entre les deux zones en dessous - au dessus du pincement. Une première conception du réseau de chaleur à été fait. Dans une étape suivante, la conception des échangeurs entres les différents fluides du réseau aura lieu, ainsi que la prise en compte des pertes d'énergie (chute en température) des stocks avec le temps. Une limitation du nombre de stocks pourrait être imposée à l'algorithme. Ceci permettra de réaliser une étude économique des solutions proposées.

## Références

- [1] E.M. Al-Mutairi, M.M. El-Halwagi. Integration method for considering scheduling in design of heat exchange networks. Applied Thermal Engineering, 2009.
- [2] Lan C. Kemp, Pinch analysis and process integration, a user guide on process integration for the efficient use of energy, second edition 2007.
- [3] Vaklieva-Bancheva N, Ivanov BB, Shah N, Pantelides CC. Heat exchanger network design for multipurpose batch plants. Comp Chem Eng 1996.
- [4] Wang YP, Smith R. Time pinch analysis. Trans IChemE 1995.
- [5] Uhlenbruck S, Vogel R, Lucas K. Heat integration of batch processes. Chem Eng Technol 2000.
- [6] De Boer R, Smeding SF, Bach PW. Heat storage systems for use in an industrial batch process (Results of) A case study. In: Contribution to The Tenth International Conference on Thermal Energy Storage. ECOSTOCK 2006.
- [7] Chen CL, Ciou YJ. Design and optimization of indirect energy storage systems for batch process plants. Ind Eng Chem Res 2008.
- [8] Majozi T. Heat integration of multipurpose batch plants using a continuoustime framework. Appl Therm Eng 2006.
- [9] Majozi T. Minimization of energy use in multipurpose batch plants using heat storage: an aspect of cleaner production. J Clean Prod 2009.